

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/278412208>

# V INGEPET 2005 (EXPL-1-SG-147) INTEGRACIÓN AFLORAMIENTO-SUBSUELO: RELACIÓN ENTRE LA COMPLEJIDAD ESTRUCTURAL Y EL COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO DE LOS RESERVORIOS DEL LO....

Conference Paper · November 2005

CITATIONS

6

READS

1,438

4 authors, including:



**Santiago A. Grosso**

YPF S.A.

26 PUBLICATIONS 74 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Denis Marchal**

Pampa Energía S.A.

70 PUBLICATIONS 501 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**José A B Daudt**

BP

33 PUBLICATIONS 54 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Regional Exploration, Southern Brazilian Basins [View project](#)



Colorado Basin [View project](#)

## **INTEGRACIÓN AFLORAMIENTO-SUBSUELO: RELACIÓN ENTRE LA COMPLEJIDAD ESTRUCTURAL Y EL COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO DE LOS RESERVORIOS DEL LOTE X, CUENCA TALARA, PERÚ.**

**S. Grosso, D. Marchal, J. Daudt — Petrobras Energía**

### **Resumen**

Se han definido las bases de un nuevo modelo estructural para los reservorios del Lote X, Cuenca Talara (Noroeste Peruano), integrando información de afloramientos a los datos de subsuelo y datos de producción. Asociado tanto a fallas como a pliegues, la deformación generada en los diferentes estilos tectónicos ha sido caracterizada y utilizada para delinear los patrones de producción.

Se analizaron los afloramientos ubicados principalmente a lo largo de la zona costera del Lote X y las características estructurales destacadas fueron aplicadas en la redefinición estructural de los reservorios. La integración entre las observaciones y estudios publicados anteriormente permitió (1) definir los diferentes estilos estructurales (distensivo, compresivo y transcurrente) afectando las formaciones del Lote X y (2) caracterizar las estructuras generadas y la deformación asociada.

El estilo distensivo se manifiesta con fallas directas. Estas pueden agruparse en 4 familias: E-O, NO-SE, N-S, NE-SO. Se encontraron varios tamaños de fallas directas, de métricas a kilométricas, formando sistemas de Horst y de Graben.

Las estructuras compresionales en afloramientos son kilométricas. A ellas se asocian las estructuras de fallas directas y de rumbo de menor escala. Los cabalgamientos se asocian a pliegues de tipo "Fault-Bend Fold" y "Fault Propagation Fold", evidenciando una deformación compresional de tipo "Thin-Skin Tectonics". Nuestras observaciones muestran que este estilo compresivo afecta a casi todos los niveles del Eoceno, desde la Formación Ostrea hasta la Formación Chira.

La deformación transcurrente se identificó solamente en un afloramiento a donde se manifiesta con falla de rumbo de dirección N-S.

En subsuelo se identificaron los mismos patrones estructurales observados en campo, principalmente extensional y compresional. Las fallas normales mayores afectan la continuidad de los reservorios generando bloques independientes, dando un aspecto poligonal a los mapas estructurales. Estructuras compresivas se interpretaron en niveles de Formación Mogollón y suprayacentes.

La productividad de la Formación Mogollón está asociada a la estructuración de este reservorio. El análisis comparativo de mapas estructural, isopáquicos y de acumulada permitió entender la productividad de los pozos en la cercanía de las fallas o al nivel de los flancos de los grandes pliegues en la Formación Mogollón en el yacimiento Zapotal.

### **Objetivos**

- El principal objetivo del trabajo fue elaborar las bases de un nuevo modelo estructural, a partir de observaciones en afloramientos y su extrapolación al subsuelo para asociarlo con datos de correlaciones de pozos y sísmica 3D.
- Un segundo objetivo fue vincular el nuevo modelo estructural y la producción del campo a partir de un ejemplo: el reservorio de la Fm. Mogollón en el yacimiento Zapotal.

## Introducción

### Marco geológico

El Lote X está ubicado en la región centro-norte de la Cuenca de Talara, al noroeste de la región costera del Perú, a 1.140km al Norte de Lima (Figura 1).

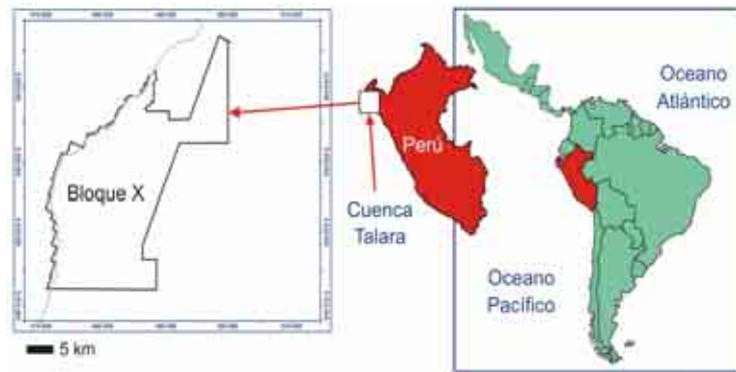


Fig. 1 - Ubicación del Lote

El lote tiene más de 4.500 pozos perforados en 17 yacimientos, con una acumulada de más de 430 MMBls barriles en casi 100 años de operación.

El basamento, productivo del área de estudio, es compuesto por una serie de rocas Paleozoicas metamorizadas en diferentes grados (Fig. 2). Sobre este basamento se pueden desarrollar tanto unidades Terciarias como unidades Cretácicas. No se tiene identificado depósitos Triásicos o Jurásicos en el Lote X. El espesor total de la columna sedimentaria en el Lote X es de unos 12.500 pies. El lote X tiene 11 reservorios productivos (principalmente terciarios) que producen en la mayoría de los 17 yacimientos.

La sedimentación terciaria está representada por un relleno predominantemente continental (fluvial) a transicional (deltas/marino somero) que culmina con una abrupta subsidencia ocurrida en el Eoceno medio (Fig. 2). Este evento regional, de carácter tectónico, causa el establecimiento de condiciones de aguas profundas donde sistemas turbidíticos de alta frecuencia representan los más prospectivos plays para hidrocarburos (ISA 2002).

ERA	PERÍODO	ÉPOCA	FORMACIÓN
CENOZOICO	CUATERNARIO		Tablazo
	TERCIARIO	OLIGOCENO	Máncora
			Carpitas
			Mirador
			Chira
			Verdún
			Pozo
			Areniscas Talara
			Lutitas Talara
			Echinocyamus
			Clavel
			Ostrea
			Mogollón
			San Cristobal
			Basal Salina
			La Draga
		PALEOCENO	Balcones
Mesa			
MESOZOICO	CRETÁCICO		
PALEOZOICO			Amotape

Fig. 2 - Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca de Talara. Tomado de ISA 2002.

### Marco Estructural del Lote X

La cuenca de Talara muestra una compleja historia tectónica asociada a la cercanía con la zona de subducción ubicada en un antearco entre las placas de Nazca y Sudamericana durante del Terciario. Para el Cretácico existía un margen pasivo de una plataforma donde se depositaron carbonatos y arcillitas sobre el Paleozoico.

La columna sedimentaria depositada se encuentra afectada por un intenso politectonismo Terciario con dirección principal del eje de la cuenca N-S, subdividida por "horsts" y "grabens" con un rumbo aproximado NE-SO y E-O. De acuerdo con Serrane 1987a y Delgado & Ardiles 1991, se estima que el Terciario fue afectado al menos por dos fases de distensión separadas por una fase compresiva.

En la costa del Lote X, entre Peña Negra y Órganos Norte, las principales fallas profundas son directas y de rumbo NE-SO, buzando al NO (Fig. 3). Al Sur de Peña Negra, frente al bajo de Siches y Carrizo, las fallas directas se orientan ENE-OSO. Estas fallas directas mayores afectan el Paleozoico hasta el Eoceno.

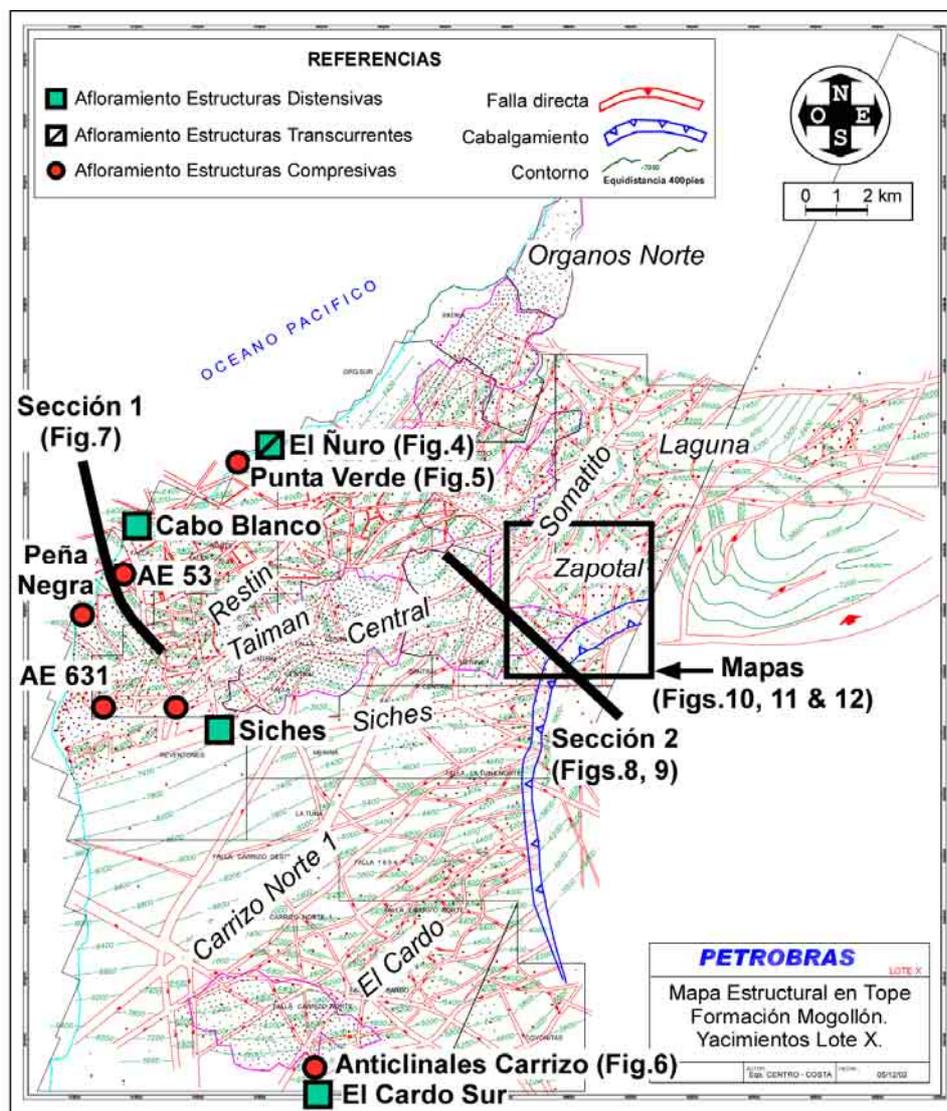


Fig. 3 - Mapa estructural de la Fm. Mogollón en el Lote X, con la ubicación de afloramientos estudiados y secciones presentadas.

Para los niveles superiores también se observan fallamientos similares con el mismo esquema de rumbos. Estas fallas han compartimentalizado los reservorios, separándolos en bloques productivos limitados por fallas mayores con orientación NE-SO y ENE-OSO. Estas fallas mayores controlaron la

potente sedimentación clástica desarrollada (espesores que superan los 12.500 pies). Entre los altos más destacados se pueden citar el alto de Central, Taiman, Peña Negra, Chimena, Lobitos, La Brea, Negritos y Portachuelo (Fig. 3); todos con prospectividad para petróleo. Los principales bajos son las artesas de Siches, La Cruz, Talara y Lagunitos, los cuales no tienen desarrollo petrolero hasta la fecha. Existen fallas de menor importancia que son consideradas como de alivio, antitéticas y sintéticas de las fallas mayores, que compartimentalizan las zonas mineralizadas de petróleo en bloques menores.

La alta complejidad estructural del área está caracterizada por la alternancia entre fases distensivas y compresivas, generando redes de fallas de diferentes tipos y con complejas relaciones. Esto se observa en el mapa estructural de la Fm. Mogollón en la Fig. 3. Esto es similar en las formaciones suprayacentes.

El sistema de cabalgamiento (fallas inversas con bajo buzamiento) se ha observado dentro de la columna sedimentaria solamente desde el Eoceno inferior en la Fm. Mogollón hasta el Eoceno Superior en la Fm. Chira (Seranne 1987a, 1987b, Delgado & Ardiles 1991, Marchal 2003).

Posiblemente exista un sistema transcurrente ubicado paralelo a la sierra de los Amotapes y a la costa del Océano Pacífico relacionado con la mega fractura Dolores-Guayaquil, ubicada al norte del Lote X (Monges 1991).

## Metodología

La redefinición del modelo estructural del Lote X empezó con el estudio de los afloramientos encontrados en la costa (de Peña Negra hasta El Ñuro), en borde de las pistas (AE361, Siches) y en algunas quebradas (Anticlinales Carrizo, El Cardo Sur en la quebrada Honda) (ver Figura 3). En cada afloramiento se destacaron las principales características de las estructuras encontradas y del fracturamiento asociado (Marchal 2003).

La integración entre las observaciones de campo y de los estudios publicados anteriormente (Seranne 1987a, 1987b, Delgado & Ardiles 1991, Monges 1991), permitió definir las características de los diferentes estilos estructurales afectando las formaciones del Lote X y buscarlas en los datos de subsuelo (datos de pozos, sísmica).

Finalmente se utilizaron las características del nuevo modelo estructural para delinear y explicar la producción del campo en un ejemplo: el reservorio de la Fm. Mogollón en el yacimiento Zapotal.

## Desarrollo

### Análisis de algunos afloramientos representativos

#### • El Ñuro

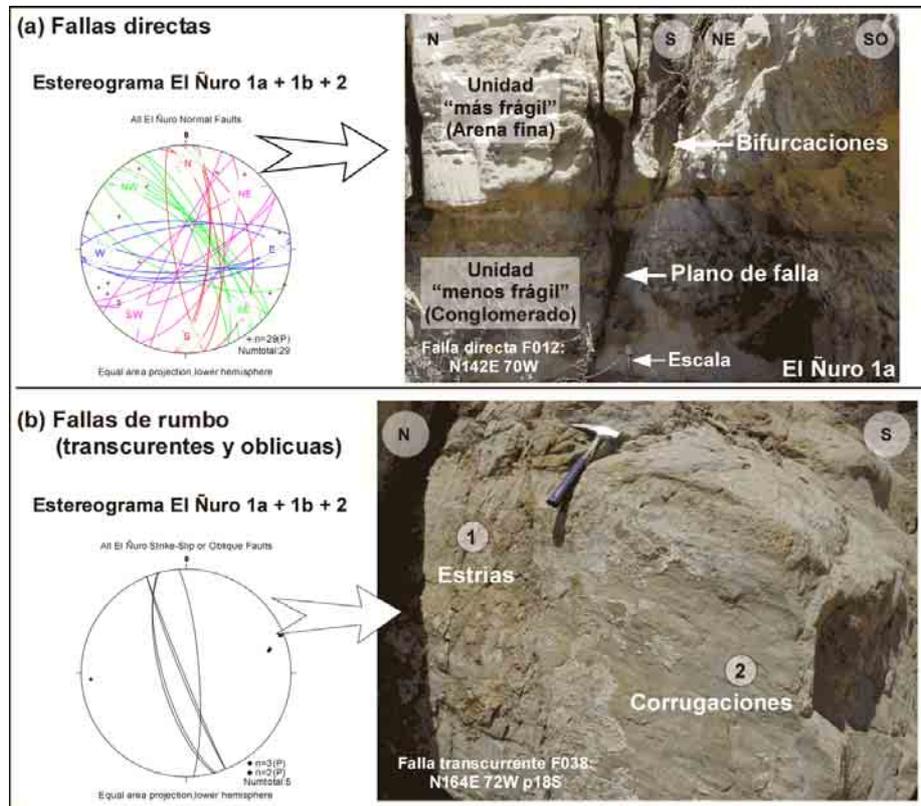
Este afloramiento se ubica en la costa, en la zona de la planta oceánica donde se extraía agua para la recuperación secundaria del yacimiento (Fig. 3). El afloramiento tiene 3 exposiciones: una escarpa orientada NE-SO a lo largo de la playa (El Ñuro 1) y 2 otras paredes orientadas N-S, de ambos lados de un camino (El Ñuro 1a & 1b).

Este afloramiento presenta las capas del miembro Cabo Blanco de la Fm. Echinocyamus. Están integradas por canales y barras de tipo fluvio-estuarino constituidas de areniscas y conglomerados de unos 70 m de espesor. Los estratos se encuentran con un rumbo E-O y un buzamiento hacia el S de unos 5° a 20° y muestran figuras sedimentarias que indican paleocorrientes principalmente hacia el Oeste y Norte (Daudt *et al.*, 2004).

En estos afloramientos se caracterizaron dos grandes tipos de fallas: las fallas directas y las fallas de rumbos (en las cuales se agrupan las fallas transcurrentes ("strike-slip") y las fallas oblicuas ("Oblique-slip").

- **Fallas Directas (Fig. 4a):** Las fallas directas encontradas presentan las características siguientes:
  - ✓ Los buzamientos medidos son de aproximadamente 65°;
  - ✓ Los saltos observados son centimétricos a métricos;
  - ✓ Los planos de fallas pueden ser sencillos (marcados por endurecimiento de arena o por relleno de calcita) hasta complejos (con "gouge" estructurada, presentando "sigmoides" de deformación);
  - ✓ Espacialmente, las fallas pueden ser aisladas o agrupadas en sistema de pequeños "horsts" y "grabens";

- ✓ La geometría de los planos de fallas está influenciada por la litología / reología de los niveles afectados;
- ✓ El estereograma de rumbo (“strike”) y buzamiento (“dip”) de las fallas estudiadas muestra una gran dispersión de los valores con las 4 grandes direcciones representadas, es decir N-S, NO-SE, O-E, NE-SO. No se puede atribuir una dirección particular a un nivel (o secuencia) específico.
- ✓ Se observaron bifurcaciones de los planos de fallas al nivel de las interfaces reológicas (mecánicas) (Fig. 4a) y concentración de fracturas alrededor de los planos de fallas.



**Fig 4 - Afloramiento El Ñuro. (a) Fallas directas: estereograma y 2 ejemplos de fracturación asociada a fallas directas, tipo bifurcación. (b) Fallas de rumbo: estereograma y foto de detalle de un espejo de falla.**

- **Fallas de rumbo (transcurrentes y oblicuas) (Fig. 4b):** Las fallas de rumbo se identificaron con indicadores cinemáticos como estrías (“slikensides”) y/o corrugaciones en los espejos de los planos de fallas:
  - ✓ De lo contrario de las fallas normales, las fallas de rumbo presentan una dirección bastante constante N-S (con reserva debido a las pocas medidas);
  - ✓ La dirección constante y el buzamiento alto de los planos son elementos a favor de un evento transcurrente independiente y no de una reactivación de los planos de fallas preexistente;
  - ✓ Por escasas relaciones geométricas, las fallas de rumbo parecen ser posterior a las fallas normales;
  - ✓ Algunas fallas de rumbo presentan dos tipos de movimientos sobre el mismo plano de falla. Eso se marca por 2 familias de estrías con pitches diferentes;
  - ✓ Las fallas de rumbo tienen dimensiones (vertical y horizontal) más grande que las fallas normales observadas en el mismo afloramiento.

#### • Punta Verde

El afloramiento llamado Punta Verde se ubica en la costa, entre los afloramientos de El Ñuro y los de Cabo Blanco (Fig. 3). La exposición principal del afloramiento es constituida por el flanco norte de una quebrada E-O, perpendicular a la línea de costa.

El afloramiento se divide en dos unidades estructurales (Fig. 5a):

**Unidad Basal:** Muestra una sucesión normal con un nivel lutítico basal (Fm. Clavel), sobre el cual están superpuestos varios niveles de arena y de conglomerados interpretados como la base del Miembro Cabo Blanco. Todas las capas de esta unidad buzanan de unos 20° al Este.

**Unidad Superior:** Muestra una sucesión que empieza, del Oeste al Este, con una cuña de lutita (atribuidas a la Fm. Clavel) presentando alto buzamiento. Sobre este se encuentran varias capas de arenas (parte basal del Miembro Cabo Blanco). En la parte basal del paquete de arena (parte Oeste), las capas presentan el mismo buzamiento que las lutitas sobre las cuales descansan. Los valores de buzamiento de las arenas disminuyen de Oeste a Este para volver a valores de buzamiento cerca de los presentados por las arenas de la unidad basal. Eso hace que, al Oeste, las arenas del Miembro Cabo Blanco parecen estar en conformidad entre la unidad basal y la unidad superior.

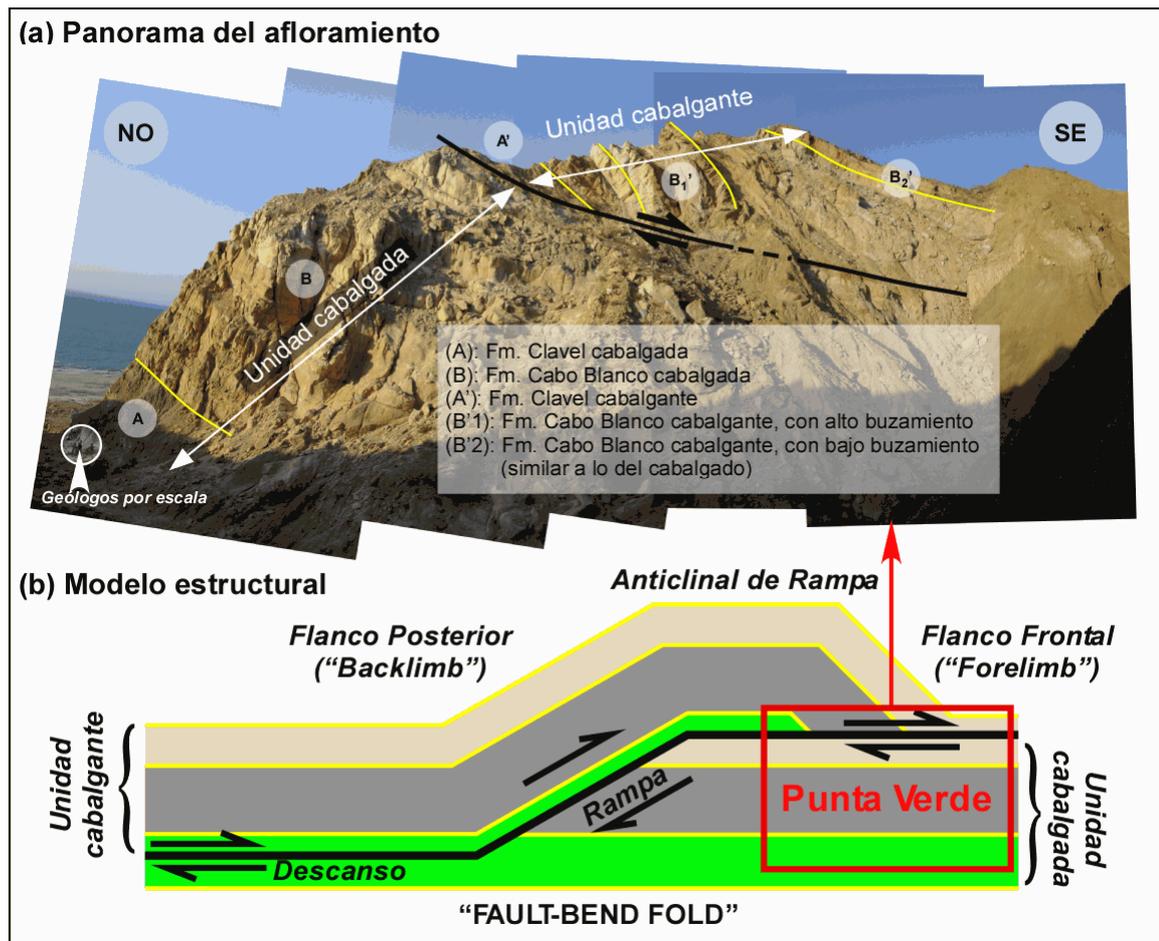


Fig. 5 - Afloramiento Punta Verde. (a) Foto-panorama interpretado de la estructura. (b) Modelo estructural conceptual de "Fault-bend fold" y relación con lo observado en el afloramiento.

Estas dos unidades estructurales están separadas por un cabalgamiento casi horizontal, la cual se identifica bien en la parte Oeste del afloramiento (Fig. 5a).

Las dos unidades estructurales reveladas por este afloramiento se interpretan como parte de una estructura más grande de tipo "Fault-Bend Fold" (Fig. 5b), en gran parte erosionada. Este tipo de estructura está típicamente constituida por una rampa sobre la cual se desarrolla un anticlinal más o menos deformado. Las lutitas de la Fm. Clavel forman el nivel de despegue sobre el cual se inicia el cabalgamiento y se efectúa el movimiento relativo entre la unidad cabalgante y la unidad cabalgada. La parte cabalgada no está muy deformada como lo demuestra el afloramiento. Por otro lado, la parte cabalgante muestra una deformación importante al nivel del anticlinal de rampa, la cual disminuye hacia el flanco frontal (Fig. 5a).

• **Anticlinales Carrizo**

El afloramiento denominado “Anticlinales Carrizo” se ubica en la Quebrada Honda Norte sobre la pared del cañadón (Fig. 3). El afloramiento se encuentra constituido por capas de la Fm. Chira, integradas por niveles limolíticos-lutíticos alternando con bancos de arenas que sirvieron como niveles guías. Sobre los mismos se dispone el Cuaternario de la Fm. Tablazo en discordancia angular.

El afloramiento presenta dos estructuras anticlinales llamadas respectivamente “anticlinal A” y “anticlinal B” (Fig. 6a):

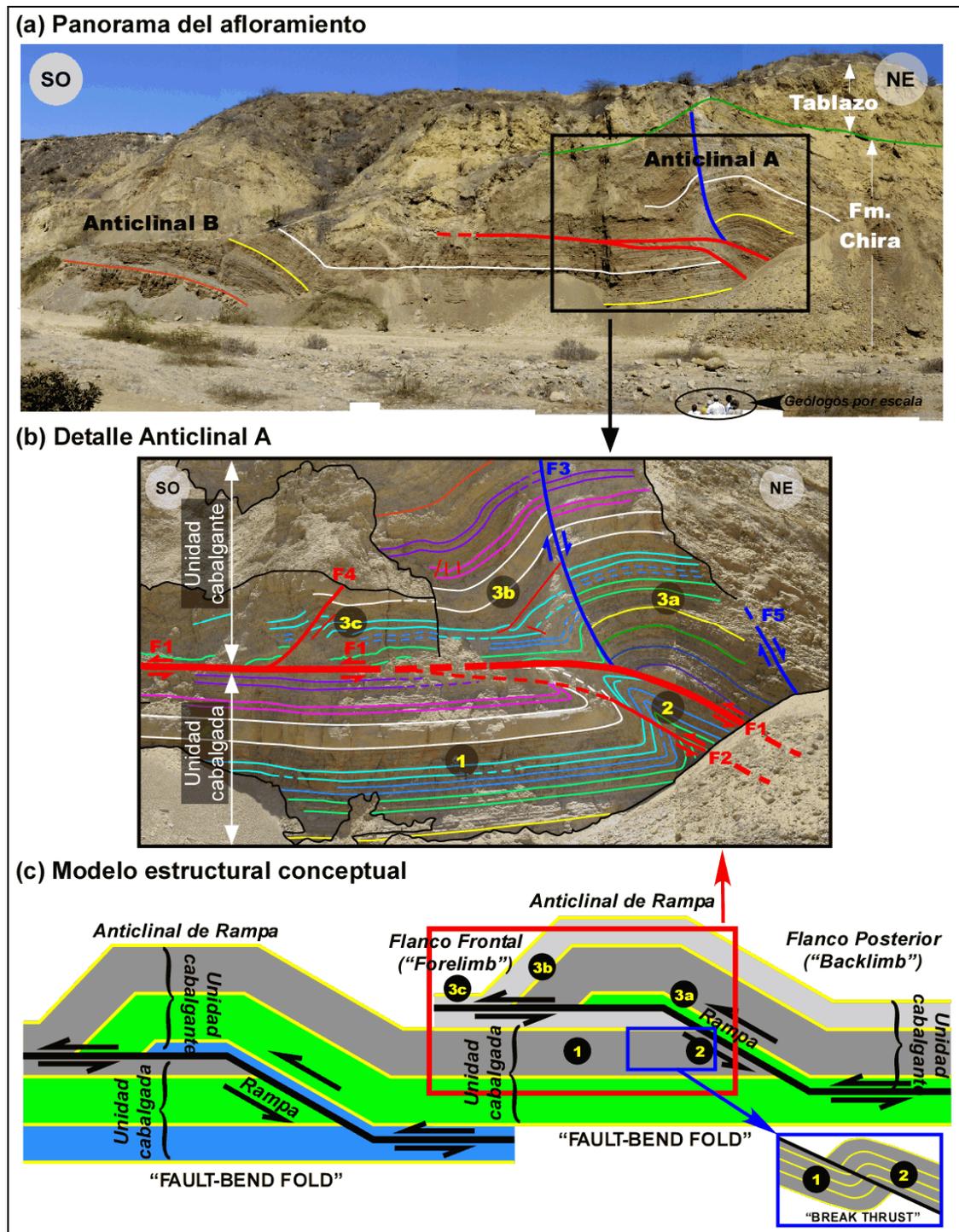


Fig. 6 - Afloramiento Anticlinales Carrizo. (a) Panorama del afloramiento presentando las 2 estructuras anticlinales. (b) foto interpretación de la parte central del anticlinal B. (c) Modelo estructural conceptual del Anticlinal B.

**Anticlinal A** - El Anticlinal A pertenece a una estructura compleja. Esta estructura está compuesta por un sistema de dos fallas inversas de bajo buzamiento (cabalgamientos F1 y F2; Fig. 6b). El cabalgamiento principal (F1, Fig. 6b) separa una unidad cabalgada de una unidad cabalgante:

- ✓ **Unidad cabalgada:** globalmente no deformada desde el Anticlinal B hacia Anticlinal A. Esta está afectada por un cabalgamiento menor (F2, Fig. 6b), el cual se conecta sobre el cabalgamiento principal en la parte alta de la rampa. Ambos lados del cabalgamiento menor muestran fuertes plegamientos ("Drag Folds" o "Flanking Structure") (2, Figura 6b) resultando del movimiento de dicha falla.
- ✓ **Unidad cabalgante:** esta parte de la estructura, muy deformada, se divide en un anticlinal de rampa (3a, Figura 6b & c) y un flanco frontal (3b y 3c, Figura 6b & c). El anticlinal está recortado por fallas directas de rumbo NO-SE y NE-SO. En la base del flanco frontal se nota un plegamiento bastante fuerte ("kink") de las capas (3b, Figura 6b). Las capas de la parte alta del flanco frontal se pliegan por paralelizarse sobre la parte subhorizontal del plano del cabalgamiento principal (3b, Fig. 6b). La parte horizontal del flanco frontal está relativamente deformada por pequeños pliegues y fallas inversas (por ejemplo F4; Fig. 6b).

**Anticlinal B** - El anticlinal B se desarrolla en la parte SO de la unidad cabalgada de la estructura Anticlinal A. Este anticlinal se desarrolla hacia el SO de manera brusca a partir de capas subhorizontales al NE, formando como un "kink" (Figura 6a). Internamente, el flanco posterior del anticlinal de rampa es afectado por micropliegues desarrollados en las partes más lutíticas (desarmonía), algunos de esos micropliegues están alineados y definen ejes de pliegue secundarios. También se observó un incremento de la fracturación del tope del anticlinal hacia el flanco posterior.

Las características geométricas de las unidades cabalgada y cabalgantes de la estructura Anticlinal A descritas arriba corresponden típicamente a una estructura de tipo "Fault-Bend Fold" (Figura 6c). Su unidad cabalgada desarrolla una estructura de tipo "Break Thrust", al nivel de la rampa del cabalgamiento principal. Una restauración preliminar de la estructura Anticlinal A estima que el acortamiento provocado por dicha estructura es del orden de 40% (Grosso & Daudt, 2003). Se interpreta la estructura Anticlinal B como el flanco posterior de un segundo "Fault-Bend Fold" formando un duplex con el primero (Anticlinal A).

Las fallas directas que están afectando las estructuras compresivas (anticlinales) parecen posteriores a la estructuración principal (Marchal 2003).

## Estilos Estructurales, Deformación y Fracturación

- **Deformación Extensional** - Se pudo observar en algunos de los afloramientos (El Ñuro, Cabo Blanco, Carrizo) varias manifestaciones de la deformación extensional. Principalmente, se observaron fallas normales de poca amplitud (salto máximo de 1 m). Estas fallas se pueden agrupar en 4 familias: E-O, NO-SE, N-S, NE-SO. Es de resaltar que esta gran dispersión en las direcciones de fallas normales se refleja también en los mapas estructurales de los reservorios, dando un aspecto poligonal (multiplicidad de pequeños bloques con bordes de dirección variable, ver Figura 3). El análisis cartográfico de Seranne 1987a y las interpretaciones de correlación de pozos en el campo sugieren de la existencia de fallas normales de mayor tamaño.

Se identificaron 3 mecanismos responsables de un incremento local de la fracturación asociada a fallas normales: (1) bifurcaciones al nivel de las interfaces reológicas (mecánicas) (Figura 4a), (2) asociación a planos de falla ("Fault-related Fractures") y (3) al nivel de las extremidades de las fallas ("Process Zones").

- **Deformación Compresional** - Estructuras típicas de la expresión de una deformación compresiva se observaron en los siguientes afloramientos: Punta Verde, AE53, Peña Negra, AE631 y Anticlinales Carrizo. Esta deformación compresiva se manifiesta principalmente con cabalgamientos y con pliegues. La característica común entre todas las estructuras encontradas es la asociación casi sistemática entre los pliegues y las fallas. Se interpreta que las estructuras compresivas son de la categoría "Fault-Related Fold" ("Fault-Bend Folding" y "Fault-Propagation Fold"), caracterizando una tectónica de tipo tangencial. De acuerdo con los resultados de Serrane 1987a, se determina en los afloramientos estudiados una vergencia de los cabalgamientos globalmente hacia el SE (Punta Verde, AE53, Peña Negra, AE631). Las únicas estructuras de vergencia al SO son las del afloramiento Anticlinales Carrizo.

En las estructuras compresivas estudiadas, se observó un incremento del fracturamiento en lugares vinculados a dos posiciones estructurales particulares: (1) al nivel de los flancos posterior y frontal de los anticlinales de rampa y (2) asociación a planos de falla.

- **Deformación Transcurrente** - Se pudo observar estructuras que atestiguan de una deformación de rumbo en un solo afloramiento (El Nuro). Esta deformación se manifiesta con fallas de rumbo N-S, con alto buzamiento. Este tipo de deformación no parece ser muy común en el Lote X. Este posiblemente puede vincularse con el sistema transcurrente descrito por Monges 1991 al Norte del Lote X.

### Integración a los datos de subsuelo

Basándose en las conclusiones del análisis de afloramiento se identificaron en subsuelo los mismos patrones estructurales observados en campo (extensional y compresional) excepto el de movimiento de rumbo que es más difícil de caracterizar tanto con sísmica 3D, como con datos de perfiles de pozos.

### Sección 1 - Zona de la Costa

La sección 1 corresponde a un corte estructural (sin balancear) del subsuelo de la zona de Peña Negra en el Oeste del Lote X (Fig. 7).

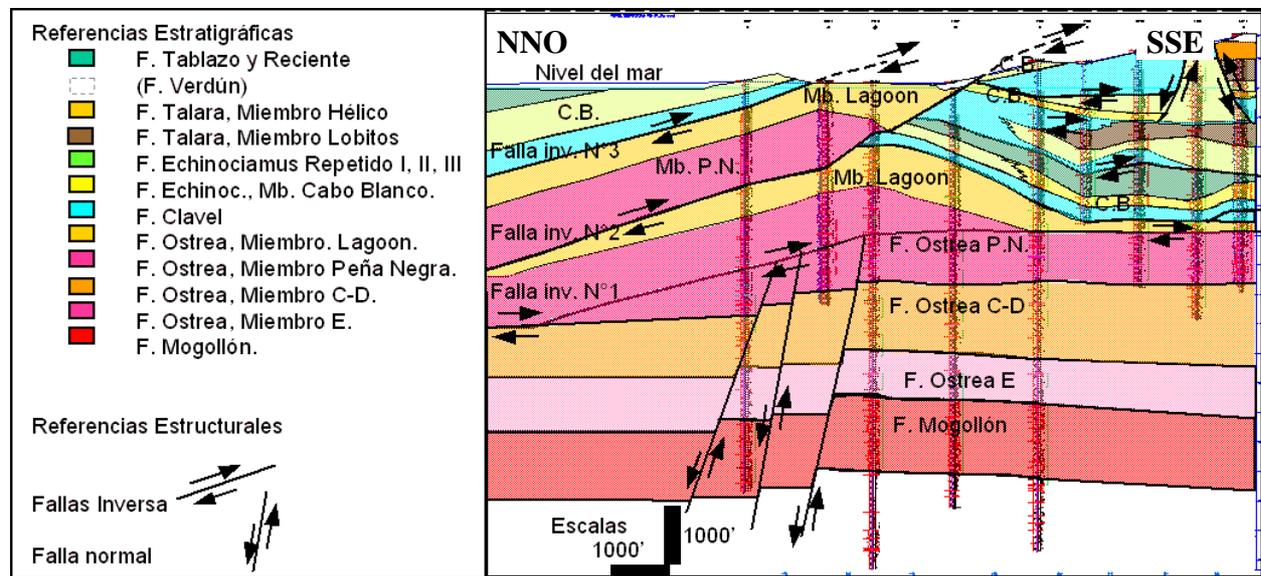


Fig. 7 - Sección Estructural 1, entre Peña Negra y Cabo Blanco (ubicación Fig. 3).

En esta sección se observa a la Fm. Mogollón afectada por fallas directas buzando hacia el NO (hacia el mar). Luego hacia arriba se observa a la Fm. Ostrea subdividida en tres miembros: Peña Negra, Ostrea C-D y Ostrea E. En el centro de la sección conforman un anticlinal originado por una rampa sobre el cabalgamiento que corre de NO a SE (Falla 1, Fig. 3) donde probablemente afecta a formaciones más profundas hacia el NO, como el Mogollón y el Paleozoico. Para la Fm. Cabo Blanco también se presentan repeticiones las cuales se interpretan haber sido generadas por cabalgamiento (Fallas 2 & 3, Fig. 7) ubicadas igualmente hacia el NO, en la zona del mar actual. Esta estructura ya fue descrita por Serrane 1987a, 1987b.

### Sección 2: Zona Laguna - Zapotal

La sección 2 corresponde a un corte estructural (sin balancear) del subsuelo de la zona de Laguna Zapotal en el Este del Lote X (Fig. 8).

Los datos de pozos evidenciaron una falla inversa de bajo ángulo (cabalgamiento Laguna-Zapotal) que repite a la Fm. Mogollón, con vergencia al Este (Fig. 8 y ver Fig. 3). Al NO del corte, la falla directa de Somatito afecta a todas las formaciones y se estima tener unos 1.800 pies de salto. Asociada a la falla de Somatito principal existen otras fallas directas sintéticas y antitéticas a la mencionada que afectan a las formaciones superiores Ostrea-Echino-Gr.Talara sin llegar a afectar a Mogollón. Sobre la charnela del anticlinal de rampa se interpretaron pequeñas fallas directas de alivio. Estas fallas afectan a la parte superior de la columna sedimentaria a veces alcanzando a la Fm. Mogollón. Otro grupo de fallas directas limita la estructura anticlinal al SE de la sección, correspondiendo en parte al extremo oriental de la falla de Siches.

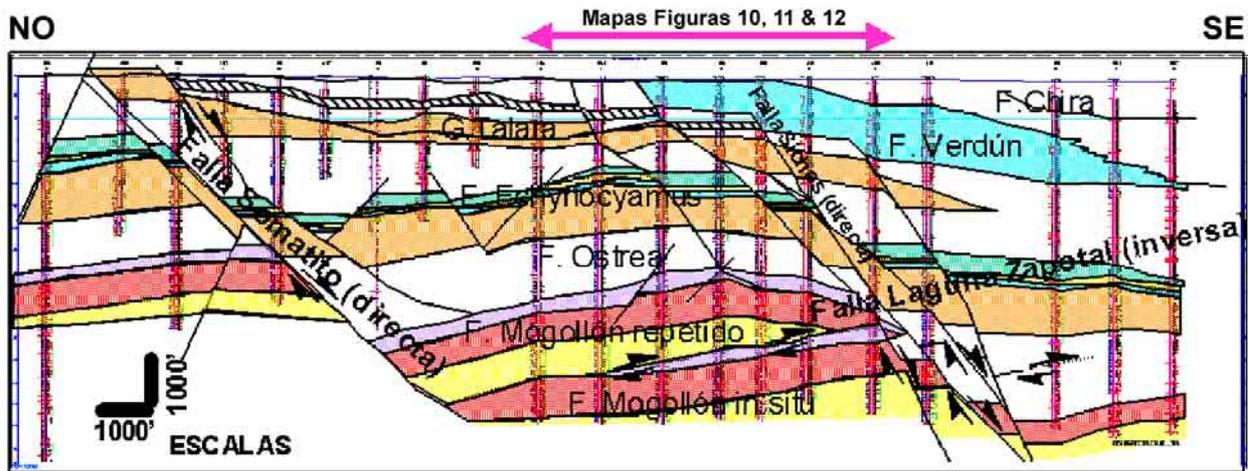


Fig. 8 - Sección Estructural 2, a través del Yacimiento Laguna (ubicación Fig. 3).

En la sección sísmica de la Fig. 9, tomada a lo largo de la sección estructural 2, se pudieron interpretar algunos de los elementos estructurales destacados por la correlación de registros de pozos.

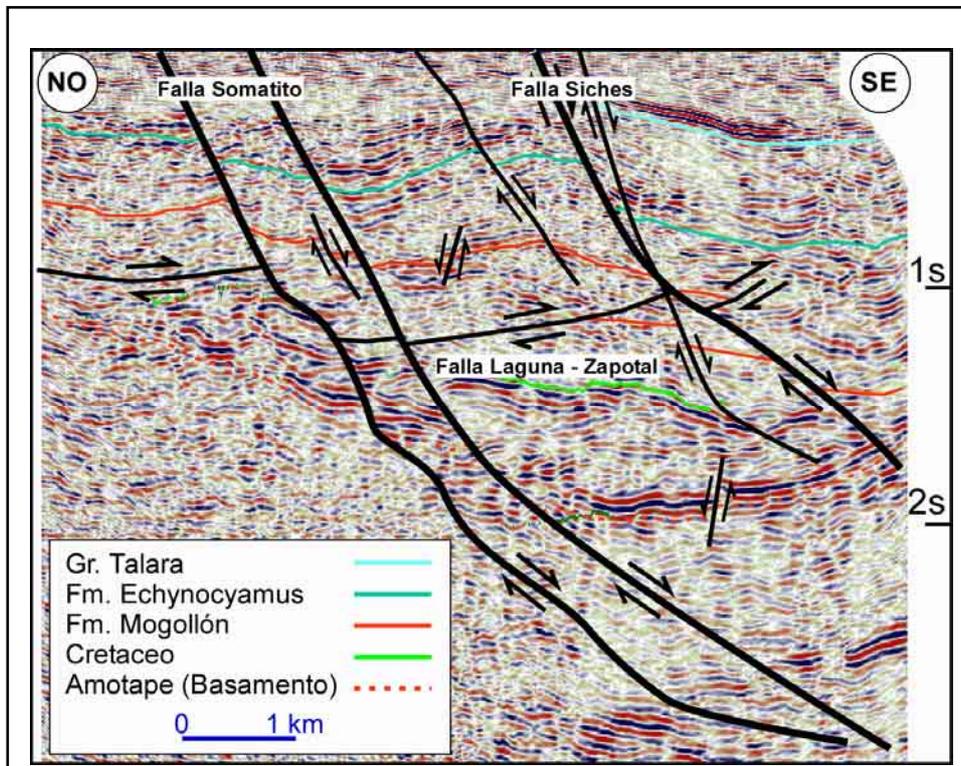


Fig. 9 - Sección Sísmica en tiempo a lo largo de la Sección Estructural 2.

### Modelo Estructural vs. Producción: la Fm. Mogollón en el Yacimiento Zapotal

La Fm. Mogollón (Eoceno Inferior) está caracterizada por cuerpos arenosos y conglomerádicos característicos de un episodio de sedimentación fluvio-marino. Esta Formación exhibe abundantes y muy rápidos cambios litológicos (de areniscas a conglomerados) en pequeños espesores. La misma es dividida en tres Miembros: Mogollón Inferior, Medio y Superior; este último compuesto de los Submiembros: Fuente, Chorro Inferior y Chorro Superior.

Litológicamente la Fm. Mogollón está integrada por areniscas masivas levemente arcillosas. La porosidad primaria es del 4-8 % y secundaria producida por disolución de minerales y por fracturamiento. La permeabilidad se encuentra en un rango de 0.1-1 md. El petróleo alojado en los poros es liviano de 24°/40 °API.

Benito & Arispe 2002 encontraron una buena correlación entre estructura y acumulación en la Fm. Mogollón a la escala de todo el Lote X, descartando una influencia importante a nivel sedimentológico. Ellos sugieren que, a nivel del reservorio Mogollón, la producción proviene de zonas con fracturas naturales localizadas, relacionadas directamente a las fallas directas y/o a estructuras asociadas como pliegues tipo “roll-over”.

### Elementos estructurales en el Yacimiento Zapotal

El elemento estructural más notable del mapa estructural (Fig. 10) es la presencia de un cabalgamiento kilométrico de rumbo NE-SO buzando al NO. Este cabalgamiento es llamado falla de Laguna – Zapotal (ver también Fig. 8) y presenta un desplazamiento de unos 1 000 metros con una dirección de transporte tectónico hacia el SE. Al nivel de la Fm. Mogollón se desarrolla una gran estructura anticlinal con “plunge” al Nor-Este en la unidad cabalgante de dicha falla. La charnela de este anticlinal presenta un rumbo NE-SO, paralelo al cabalgamiento de Laguna - Zapotal (Leyva & Daudt, 2003). Este anticlinal se interpreta como el resultado del juego de la falla Laguna – Zapotal, como lo sugiere fuertemente las similitudes de rumbos entre ambas estructuras.

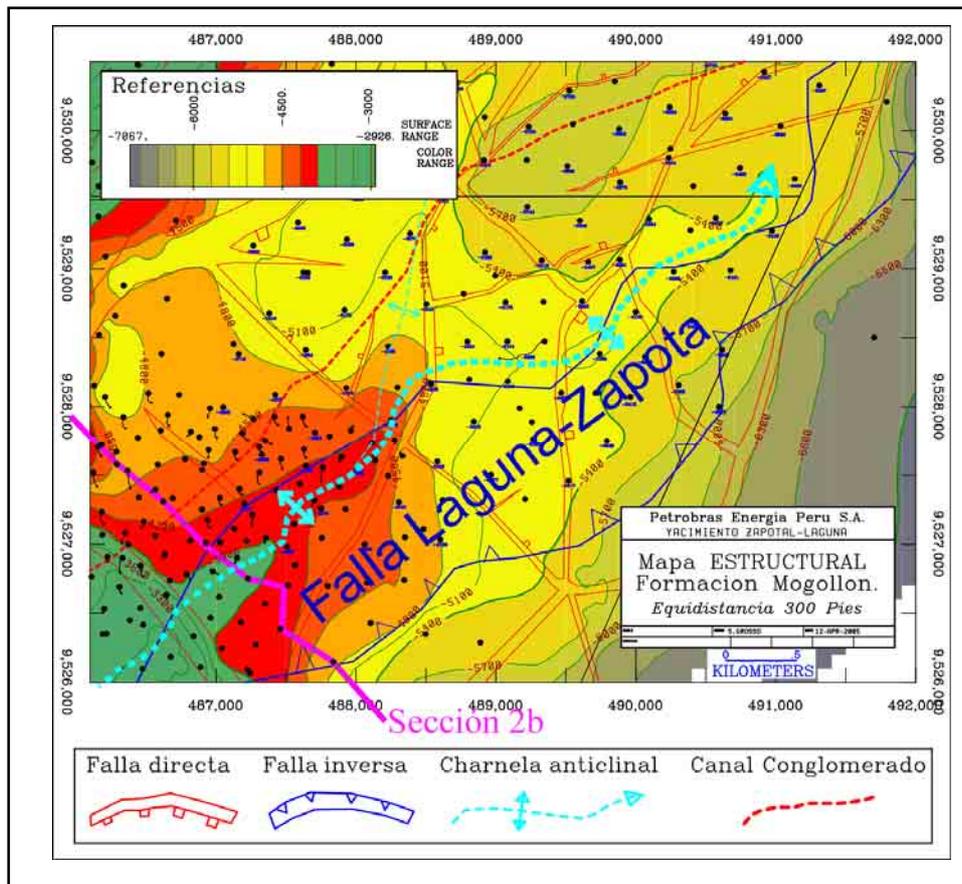


Fig. 10 - Mapa estructural de la Formación Mogollón en el Yacimiento Zapotal.

Las fallas directas en el mapa de la Fig. 10 presentan cuatro rumbos diferentes, muy similar al observado en los afloramientos de la localidad de El Ñuro. Uno principal NE-SO, le sigue en orden de importancia el de rumbo NO-SE, otro ENE-OSO y otro N-S que se unen conformando la alta compartimentalización del reservorio. La falla principal directa más importante, ubicada al Oeste de la zona detallada en el mapa, se conoce como la falla de Somatito, la cual es paralela al cabalgamiento de Zapotal-Laguna. El desplazamiento horizontal de la falla directa de Somatito es de 500 metros. El sistema de fallas directas que tiene un rumbo NO-SE genera bloques escalonados, originando el hundimiento de la estructura hacia el norte (ver alineamiento de los contornos estructurales sobre estas fallas en Fig. 10). Debido a diferencias en contacto gas / petróleo, se concluye que las fallas directas con rumbo NO-SE son de tipo sellantes.

Otro sistema de fallas directas se ubica cercano y paralelo a la falla inversa levemente desplazado hacia el Este. Se interpreta que el sistema de fallas directas de rumbo NE-SO, limitando la estructura anticlinal de la Fm. Mogollón al Este, corta el cabalgamiento de Laguna – Zapotal. Eso demuestra la posterioridad del evento distensivo originando el sistema de falla NE-SO sobre el evento compresivo que generó el cabalgamiento de Laguna – Zapotal.

Cabe destacar que el eje anticlinal de menor tamaño de rumbo casi N-S, ubicado en el bloque levantado de la falla directa inmediatamente al Este de éste (Fig. 10) y conectándose sobre el eje anticlinal principal, se interpreta como el resultado de un pliegue de arrastre (“drag fold”) asociado al movimiento de la falla directa adyacente.

### Componente Sedimentológico

El mapa isopáquico de arena petrolífera de la Fm. Mogollón (Mogollón repetido y Mogollón *in situ*) muestra mucha similitud con el mapa estructural ya que a mayor elevación hay mayor espesor. Eso es debido a la unidad cabalgante de la falla Laguna Zapotal que duplica el espesor a lo largo del anticlinal asociado (ver Fig. 8). También se nota el efecto de las fallas normales NO-SE, escalonando la estructura hacia el NE y provocando una variación brusca de espesores.

En la Fig. 11 se muestra un mapa isopáquico de los conglomerados que se encuentran en la Fm. Mogollón de la unidad cabalgante. Los mayores espesores de conglomerados se ubican en un eje canalizado con rumbo NE-SO. Ese traduce una característica depositacional, probablemente un canal.

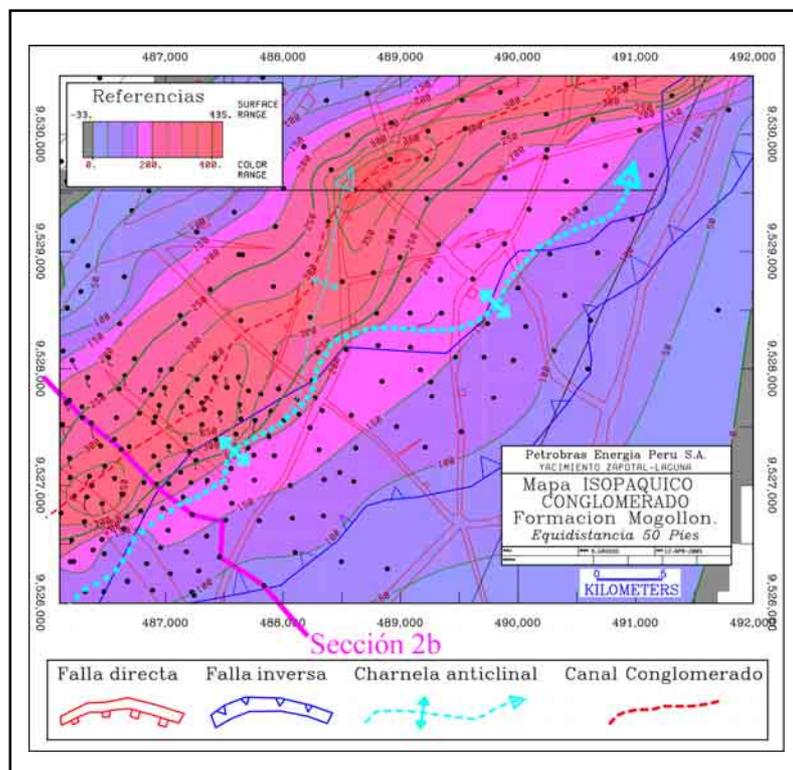


Fig. 11 - Mapa Isopáquico de la Fm. Mogollón - Conglomerado Miembros Chorro Inferior y Fuente (Yacimiento Zapotal).

### Producción de la Fm. Mogollón: un origen claramente estructural

La superposición de las características estructurales (ejes anticlinales principalmente) sobre el mapa de acumulada de petróleo de la Fm. Mogollón muestra una relación estrecha entre los mismos (Fig. 12). Cabe recordar que esta tendencia estructural corresponde a un cabalgamiento que se desarrolló al nivel de Mogollón.

Desde el sector SO del mapa a ambos lados de la charnela anticlinal y hacia el NE alineado paralelamente con la charnela o ligeramente desplazados respecto del eje se registran las mayores acumuladas de hasta 500.000 barriles. Notar que las mayores acumuladas se ubican en donde el cabalgamiento de Laguna-Zapotal tiene mayor rechazo (Fig. 12).

Otra zona de gran acumulada se ubica hacia el Sur-oeste en el borde de la Fig. 12, y corresponde a la intersección de la falla inversa de Laguna con el extremo oriental de la falla directa de Siches la cual es importante y buza hacia el Sur. Por otro lado, las altas acumuladas disminuyen bruscamente al Sur a partir de un límite que parece estar vinculado a la falla directa ubicada más al Sur que ya provoca un escalamiento importante de la estructura, como se nota en el mapa estructural (Fig. 10). Otra hipótesis es que esta disminución de las acumuladas hacia el SO se asocia a la disminución del rechazo del cabalgamiento de Laguna – Zapotal hacia el SO.

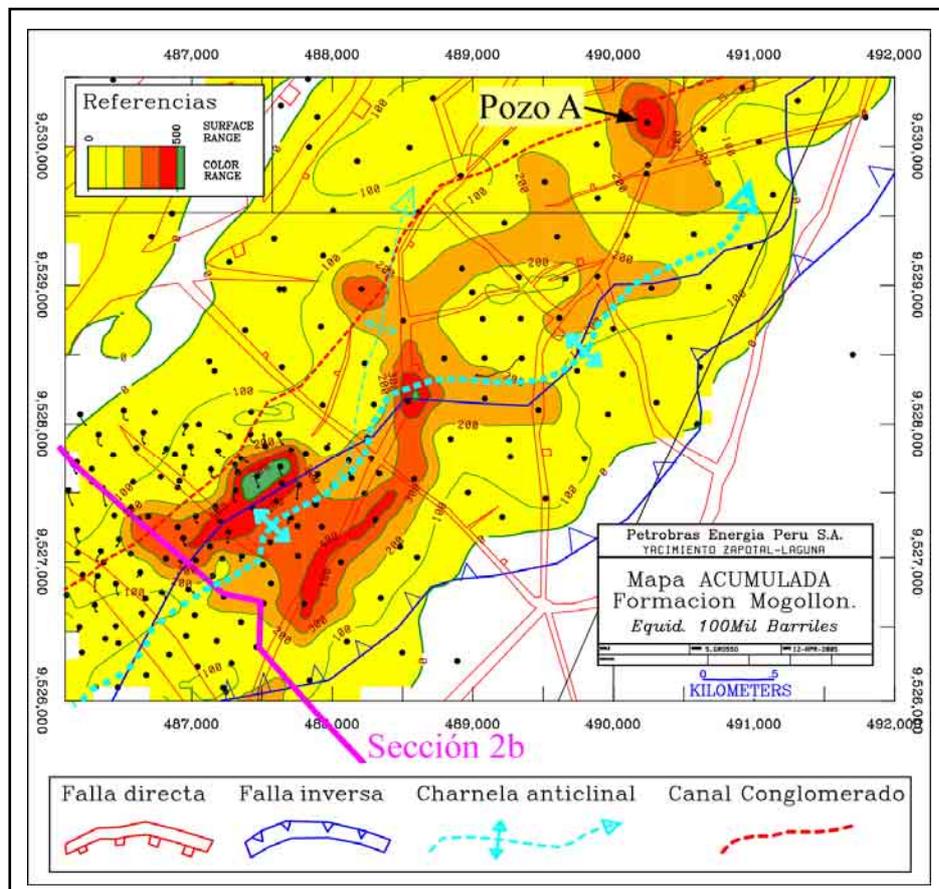


Figura 12 - Mapa de Isoacumulada de la Fm. Mogollón y los principales elementos estructurales.

Otra alineación de la producción se observa paralela al mayor espesor de conglomerados del Miembro Chorro Inferior y Miembro Fuente de Fm. Mogollón de la unidad repetida (Fig. 12). El espesor de conglomerados hace que sea coincidente en parte con la mayor producción de petróleo en parte porque posee mayor permeabilidad debido a su mayor granulometría. Ubicado al NE del mapa, en la intersección del eje de conglomerados con una falla directa, se observan pozos como el pozo A (Fig.12) que alcanzó una acumulada de más de 500.000 barriles.

Cabe destacar que el mapa de acumuladas se correlaciona, a grandes rasgos, con el mapa isopáquico de arena total perforada, ya que a mayor producción hay mayor espesor. Sin embargo, como el espesor de arena total perforada está directamente vinculado al anticlinal de la unidad cabalgante, esta correlación es también de origen estructural.

Las mayores acumuladas de los pozos de la Fm. Mogollón en el yacimiento Zapotal tienen relación con:

1. La estructuración principal del reservorio que controla la deformación en los flancos del anticlinal (principalmente) y el espesor de arena mineralizada total (repetición).
2. El alineamiento a las grandes fallas, que sean inversas o directas.
3. La litología y los cuerpos sedimentológicos (canal).

La combinación de estos elementos permite igualmente incrementar localmente la producción de algunos pozos. Cabe destacar que la zona de mayor acumulada (zona de más de 500.000 barriles en (Fig. 12) combina 2 elementos: el flanco posterior del pliegue y el centro del canal en los conglomerados.

En una estructura de tipo "Fault-Bend Fold", las zonas más deformadas (fracturadas) están ubicadas en la unidad cabalgante, principalmente al nivel de los flancos del anticlinal de rampa, ya sea el posterior o el frontal (por ejemplo Wilkerson & Dicken 2001) (Fig. 13). Así las mayores acumuladas se distribuyen de ambos lados de la charnela anticlinal, como se observa en el mapa de acumulada de la Fig. 12. Eso sugiere que la estructura afectando el Mogollón del yacimiento Zapotal sería de tipo "Fault-Bend Fold", como ya se encontró varias veces en afloramiento en varios lugares del Lote X.

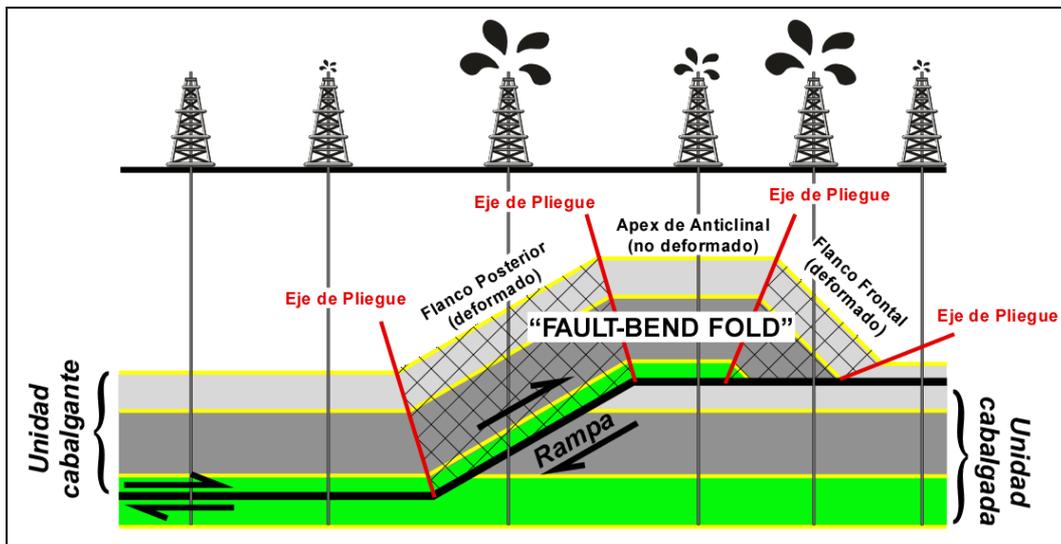


Fig. 13 - Estructura y Producción: ejemplo de un "Fault-Bend Fold"

El trabajo presentado para el reservorio Mogollón del yacimiento Zapotal consiste el primer paso de una revisión sistemática a los demás yacimientos y reservorios del Lote X bajo la misma metodología. Igualmente se necesita completar dicha metodología con, principalmente, el balanceo de las secciones estructurales, el análisis detallado de la fracturación al nivel de pozo (coronas, registros de imagen, etc.) y, por supuesto, la información de afloramientos adicionales.

Ya se puede adelantar que el análisis comparativo de los patrones estructurales con las características de la producción en Formaciones como Ostrea o Echinocyamus también sugiere la predominancia del control estructural *versus* el estratigráfico sobre la producción de la mayoría de los pozos en estos reservorios. Eso explicaría porque en las Formaciones Echinocyamus y Ostrea se ha observado un mejor comportamiento productivo en la zona de la costa que en otras zonas del Lote X, probablemente relacionado al incremento de la deformación compresiva del interior (Este) hacia la costa (Oeste).

## Conclusiones

- Los estudios de afloramientos ubicados en superficie del Lote X permitieron definir los diferentes estilos estructurales afectando el campo: principalmente distensivo y compresional y ocasionalmente transcurrente:
  - La tectónica distensiva se evidencia por fallas directas presentando 4 grandes direcciones (N-S, NO-SE, O-E, NE-SO). Estas direcciones se encontraron tanto en superficie (afloramiento) como en subsuelo.
  - La deformación compresional presenta una tectónica tipo de cobertura somera (“*Thin skin*”) manifestada en superficie principalmente por estructuras de tipo “Fault-Bend Fold”, con vergencia al SE. Se observaron estas estructuras en casi todas las Formaciones del Eoceno, en afloramiento como en subsuelo. Esta deformación compresiva parece disminuir del NO hacia el SE, del mar hacia el continente.
  - La tectónica transcurrente, observada en un solo afloramiento, está representada por fallas de rumbo, de rumbo N-S. Aún si son tipos de fallas difíciles de identificar con datos de subsuelo, estas fallas parecen ser muy escasas en el Lote X.
- Se lograron encontrar los patrones estructurales destacados con el estudio de afloramiento en los datos de subsuelo (correlación de pozos y sísmica).
- El nuevo modelo estructural aplicado al reservorio de la Fm. Mogollón del yacimiento Zapotal presenta una distribución espacial del sistema permeable que permite explicar las características principales de los datos de producción: la mayor productividad se ubica en los flancos de anticlinal de rampa de estructura de tipo “Fault-Bend Fold” y al nivel de las zonas de falla (cabalgamiento como por grandes fallas directas). La productividad también parece estar asociada con ciertos elementos sedimentológicos como canales en las Formaciones conglomerádicas. Los pozos de mejor productividad son los que maximizan los factores estructurales con los sedimentológicos.
- La metodología desarrollada permite extrapolar los patrones estructurales destacados por análisis de afloramientos en el campo mismo a los datos de subsuelo como la correlación de pozo y la sísmica 3D, aún cuando esta última es de mala calidad. Esto permite tener un modelo estructural más robusto para los reservorios, lo cual, cuando es apoyado con los datos de producción de los pozos ya perforados, debe utilizarse para el manejo del campo (perforación, secundaria, etc.).

## Bibliografía

- Benito J. & Arispe A., 2002. Análisis geoestadístico de datos de productividad de la Formación Mogollón en el Lote X. *Ingepet 2002*, EXP.-2-JB-31, 15 p.
- Daudt J., Grosso S. & Sullivan M., 2004. Sea level changes and tectonic influence in the deposition of the Cabo Blanco Member: Example of an Eocene fluvio-estuarine system in Talara Basin, NW Perú. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v. 97, Julio.
- Delgado M. & Ardiles C., 1991. Análisis tectono-sedimentario del Eoceno Medio-Superior del área norte de la cuenca Talara-noroeste del Perú. *Ingepet*.
- Grosso S. & Daudt J., 2003. Reporte avance proyecto modelado de Fracturas del Lote X, observaciones de superficie salida de campo 11p. *Informe interno Petrobras*.
- ISA (Informe de Situación Actual), 2002, Lote X, Cuenca de Talara, Perú. *Informe interno Petrobras*.
- Leyva J. & Daudt J., 2003. Tectonic influence in trap generation during Early Eocene, Talara forearc basin, NW Perú: a case study of the Mogollón Formation. *VII Simposio Bolivarioano-Exploración Petrolera en las cuencas subandinas*.
- Marchal D., 2003. Reporte: Asesoría Geología Estructural, Salida de campo del 29/9/03 al 03/10/03, Perú-Talara, 23 p., 14 lám., *Informe interno Petrobras*.
- Monges C., 1991. Evidencias de compresión en la Cuenca Talara en el Eoceno Medio-Tardío. Hipótesis sobre su origen. *VII Congreso Geológico Peruano*, p.333-338, Tomo 1.
- Serrane M., 1987a. Informe geológico sobre la evolución tectónica y sedimentaria de la Cuenca Talara, *IFEA/PetroPeru*, Lima, Perú. 73p, 49 figs. 18 pl. 1 anexo.
- Serrane M., 1987b. Evolution tectono-sédimentaire du bassin de Talara (nordouest du Perou). *Bulletin Institut Français d'Etudes Andines*, XVI : 103-125.
- Storti F. & Salvini F., 1996. Progressive Rollover Fault-Propagation Folding: A Possible Kinematic Mechanism to Generate Regional-Scale Recumbent Folds in Shallow Foreland Belts. *AAPG Bulletin*, 80, 2, 174-193.
- Wilkerson M.S: & Dicken C. 2001 – Quick-look techniques for evaluating two-dimensional cross sections in detached contractional settings. *AAPG Bulletin*, 85, 10, 1759-1770.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a Petrobras Energía la posibilidad brindada de publicar este trabajo. Se agradece a J. Leyva, W. Espiritu y E. Salcedo por el intercambio de ideas para este trabajo.